

## ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ В ДІАГНОСТИЦІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація:** Діагностика силових трансформаторів є критично важливою для забезпечення їх надійної та ефективної роботи. Раннє виявлення дефектів дозволяє знизити ймовірність серйозних поломок, які можуть призвести до великих витрат на ремонт чи заміну обладнання, а також до простоїв у роботі електричної мережі. Частотний аналіз є одним із ефективних методів для діагностики трансформаторів. Він дозволяє виявляти дефекти ізоляції, механічні пошкодження та перевантаження шляхом аналізу сигналів, що знімаються під час роботи трансформатора.

**Ключові слова:** частотний аналіз, діагностика, силові трансформатори, дефекти, ізоляція, обробка сигналів, надійність, ефективність, технічний стан.

**Abstract:** Diagnostics of power transformers is critical to ensure their reliable and efficient operation. Early detection of defects reduces the likelihood of serious breakdowns, which can lead to high costs for repair or replacement of equipment, as well as downtime in the electrical network. Frequency analysis is one of the effective methods for diagnosing transformers. It allows you to detect insulation defects, mechanical damage and overloads by analyzing signals recorded during transformer operation.

**Keywords:** frequency analysis, diagnostics, power transformers, defects, insulation, signal processing, reliability, efficiency, technical condition.

### Вступ

Методи діагностики технічного стану силових трансформаторів базуються на аналізі контрольованих діагностичних параметрів, що спрямовані на оцінку їхнього стану, а також на виявлення причин та місця можливих пошкоджень. Для цього виміряні значення діагностичних показників порівнюються з нормативними значеннями або допустимими відхиленнями від попередніх результатів, що дозволяє виявити відхилення в роботі обладнання. Такий підхід дозволяє проводити своєчасну діагностику та підтримувати ефективність роботи трансформаторів. Однак, традиційне технічне обслуговування силових трансформаторів здебільшого здійснюється за планом. Планова технічна діагностика здійснюється відповідно до діючих норм і стандартів, що визначають порядок і періодичність перевірок, а також вимоги до оцінки технічного стану обладнання.

Крім того, планова діагностика дає змогу робити висновки про можливість подальшої експлуатації обладнання після відпрацювання нормативного терміну служби, що є важливим для запобігання позаплановим аваріям та зменшення витрат на ремонт і заміну обладнання [1]. Однак цей підхід має свої обмеження. Він дозволяє систематично перевіряти стан трансформаторів, проводити необхідні регулювання і ремонти, але не завжди здатний вчасно виявити приховані дефекти або виявити проблеми, які можуть виникнути між запланованими перевірками. Саме тому зростає важливість застосування сучасних методів діагностики, таких як частотний аналіз, який дозволяє своєчасно виявляти несправності, що можуть виникнути в процесі експлуатації трансформаторів, навіть до того, як вони призведуть до серйозних поломок або аварій.

### Результати дослідження

Аналіз FRA (Frequency Response Analyzer) – аналіз частотного відгуку, що дозволяє однозначно оцінити стан активної частини трансформатора, встановити необхідність ремонту, вказати конкретне місце та вид дефекту [2]. Метод FRA ґрунтується на принципі, що будь-які геометричні деформації або зміни конфігурації обмотки впливають на внутрішні відстані між витками та обмотками, змінюючи її ємність і індуктивність. Силові трансформатори проектуються таким чином, щоб витримувати механічні навантаження, однак під час їх експлуатації існує ймовірність перевищення цих навантажень, що може призвести до виникнення механічних відхилень. Такі відхилення можуть виникати під час транспортування трансформатора з заводу на місце встановлення, під час розвантаження на трансформаторний майданчик або через короткі замикання поблизу трансформатора. Механічні

пошкодження можуть призвести до серйозних проблем, таких як деформація обмотки, зміщення осердя або погіршення ізоляції. Такі дефекти можуть значно вплинути на роботу трансформатора і навіть призвести до його аварії, якщо не виявити їх вчасно. Для виявлення цих проблем ефективно застосовується метод тестування за допомогою SFRA (Sweep Frequency Response Analysis), що дозволяє уникнути запуску трансформатора з потенційними дефектами, які можуть призвести до критичних відмов [2].

Метод FRA (Frequency Response Analysis) має два основних підходи до аналізу, кожен з яких використовує різні методи вимірювання і обробки сигналів, що дозволяє отримати детальну інформацію про технічний стан трансформатора [3].

Impulse FRA використовує імпульсні сигнали для аналізу реакції трансформатора. У цьому підході подається короткий імпульс на трансформатор, і вимірюється відгук у часовій області. Результати вимірювань у часовій області потім конвертуються у частотну характеристику, що дає змогу виявити зміни у параметрах трансформатора, такі як деформація обмоток або зміщення осердя. Імпульсний сигнал має високу швидкість зміни і здатний відображати швидкі механічні зміни в обладнанні. Цей метод є корисним для виявлення дефектів, що можуть з'являтися внаслідок короткочасних механічних впливів, таких як удари або вібрації, що виникають під час транспортування чи експлуатації.

Sweep FRA використовує гармонійний сигнал, частота якого поступово змінюється в широкому діапазоні. Відгук трансформатора вимірюється безпосередньо у частотній області, що дозволяє отримати більш точну картину його стану. Цей метод є особливо чутливим до незначних змін у характеристиках трансформатора, що можуть бути результатом зношування ізоляції або інших дрібних пошкоджень. Завдяки поступовій зміні частоти сигналу можна отримати більш детальні результати, що допомагають виявити проблеми, які можуть не бути помічені іншими методами діагностики. Sweep FRA дозволяє виявляти навіть незначні зміни, що можуть призвести до серйозних проблем у майбутньому, забезпечуючи таким чином надійний захист обладнання.

Порівняння SFRA та IFRA:

- Методика: SFRA використовує синусоїдальні сигнали різної частоти, тоді як IFRA — імпульсні сигнали.
- Чутливість: SFRA має хорошу чутливість до механічних дефектів та зміщення обмоток, а IFRA може бути більш чутливим до пошкоджень, що виникають у швидких електричних процесах.
- Точність: Оскільки IFRA працює з імпульсами, в той час як SFRA дає загальну картину частотних характеристик трансформатора.

У випадку з імпульсним методом джерелом сигналу є генератор прямокутного імпульсу, внаслідок чого вхідний сигнал є спектром різних частот. Процес вимірювань відбувається швидко, за кілька секунд, що є великою перевагою, коли потрібно отримати результати за короткий час. Однак цей метод має певні обмеження в роздільній здатності на низьких частотах (НЧ), оскільки імпульсний сигнал може призводити до погіршення точності вимірювань у цій області спектра. Це обумовлено тим, що прямокутні імпульси мають широкий діапазон частот, що може викликати інтерференцію та неточності при аналізі низькочастотних компонент. SFRA передбачає застосування до обмоток трансформатора різних частот і аналіз отриманої частотної характеристики для виявлення відхилень від еталонного сигналу або «відбитка» трансформатора. Ці сигнали слугують унікальним «відбитком» структурної цілісності та електромагнітних властивостей трансформатора.

### Висновки

Порівнюючи результати SFRA з базовими параметрами або довідковими даними аналогічних пристроїв, можна з високою точністю виявити деформації обмоток, механічні зсуви і деформації осердя. Порівняно з SFRA, метод IFRA має кілька переваг, зокрема: менша витрата енергії (завдяки використанню імпульсів замість безперервного сигналу), швидкість вимірювання (імпульсний метод дозволяє виконувати аналіз значно швидше, оскільки результати отримуються практично миттєво після подачі імпульсу). Однак, ці переваги повинні зважуватися на фоні технічних обмежень IFRA, таких як менша точність у низькочастотному діапазоні та більша чутливість до завод. Тому вибір методу залежить від завдань: оперативність та енергоефективність (IFRA) або детальність та точність (SFRA).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.Лагутін В. М. Бурикін О. Б., Тептя В. В. Експлуатація електричних станцій. Ч. I. Технічне обслуговування електричних машин та трансформаторів : навчальний посібник Вінниця : ВНТУ, 2013. 93 с.

2.Нові рішення у підході до діагностики силових трансформаторів. Режим доступу URL: <https://etalonpribor.com.ua/novyie-resheniya-v-podhode-k-diaagnostike-siloviyh-transformatorov.html>

3.Abeywickrama, N. Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers. / Abeywickrama, N., Serdyuk, Y. V., & Gubanski, S. M.// IEEE Transactions on Power delivery, 23(3), 1432-1438. – DOI:10.1109/TPWRD.2007.909032

**Сліденко Микола Олегович** – студент групи ЕС-21б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [slidenkonick@gmail.com](mailto:slidenkonick@gmail.com).

**Тептя Віра Володимирівна** – к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [teptyavira@gmail.com](mailto:teptyavira@gmail.com).

**Mykola O. Slidenko** - student of group ES-21b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [slidenkonick@gmail.com](mailto:slidenkonick@gmail.com).

**Vira V. Teptya** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [teptyavira@gmail.com](mailto:teptyavira@gmail.com).